

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"**

Коліушко Денис Георгійович

УДК 621.316.9

**УДОСКОНАЛЮВАННЯ ДІАГНОСТИКИ ЗАЗЕМЛЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ
ЕЛЕКТРОЕНЕРГООБ'ЄКТІВ**

Спеціальність – 05.11.13 – прилади і методи контролю
та визначення складу речовин

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2003

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут", Міністерство освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор
Клепиков Володимир Борисович,
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут",
завідувач кафедри автоматизованих
електромеханічних систем

Офіційні опоненти: – доктор технічних наук, професор
Гурин Анатолій Григорович,
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут",
завідувач кафедри електроізоляційної
та кабельної техніки;

кандидат технічних наук
Кім Єн Дар,
Науково-дослідний інститут високих напруг, м. Слов'янськ
заступник директора з наукової роботи.

Провідна установа – **Національний технічний університет України**,
"Київський політехнічний інститут",
кафедра "Прилади та системи неруйнівного контролю",
Міністерство освіти і науки України, м. Київ

Захист відбудеться "18" грудня 2003 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д **64.050.09** у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університета "Харківський політехнічний інститут".

Автореферат розісланий "7" листопада 2003 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Горкунов Б.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

В електротехнічних пристроях (відкриті і закриті розподільчі установки, автоматичні телефонні станції, нафтоперегонні станції, машинні і комп'ютерні зали і т.д.) безпечна експлуатація і нормальне їхнє функціонування в значній мірі обумовлюється якістю виконання заземлювального пристрою. Для оцінки працездатності заземлювального пристрою, (ЗП), що забезпечує захист технічного стану електроенергооб'єкта, застосовуються різні технічні способи контролю. Однак, існуючі методи контролю і вимірювальні параметри не дають повної інформації про реальне розташування елементів ЗП. Тому до теперішнього часу перевірити якість конструктивного виконання ЗП в процесі експлуатації енергооб'єктів було можливо тільки шляхом відкопування, що в силу надмірної трудоємності не виконувалося, хоча вимогами нормативних документів передбачається проведення подібного контролю кожні 12 років. При цьому, розрахункова перевірка, передбачена в нормативних документах, також не може бути реалізована без знання реального розташування ЗП на момент іспиту. Тому розробка нових технічних способів для здійснення систематичного контролю ЗП методом неруйнівного контролю, без розкриття ґрунту і відключення устаткування є винятково важливою й актуальною задачею.

У випадку несправності ЗП можливий вихід з ладу обладнання значної вартості, а також виникають труднощі при виконанні ремонтних і модернізаційних робіт, особливо при реконструкції підстанцій і заміні старого обладнання на більш сучасне.

Актуальність цієї задачі підсилюється тим фактом, що в даний час в Україні на підстанціях встановлюються пристрої релейного захисту й автоматики як іноземного, так і вітчизняного виробництва на основі мікропроцесорної техніки, яка набагато менш, ніж релейно-контакторна, захищена від впливу завад, причиною яких може стати несправний ЗП.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Проведені в дисертації дослідження виконані відповідно до держбюджетних тем Міністерства освіти і науки України реєстраційний номер 0198U000359 "Комплекс устаткування і методика для нового методу діагностики будь-яких видів заземлювальних пристроїв" і реєстраційний номер 0101U003808 "Розробка керівних документів по електромагнітній діагностиці заземлювальних пристроїв на базі створених вимірювальних комплексів КДЗ-1 і ІК-1", які виконувалися НДПКІ "Молнія" НТУ "ХПІ".

Теоретичні розробки, приведені в дисертаційній роботі, використовувалися при виконанні робіт з госпдоговірної теми № 34782 "Експертиза рекомендацій з ремонту заземлювального пристрою (ЗП) підстанцій з використанням електромагнітної методики діагностики і повторний розрахунок розподілу потенціалів по території ЗП по розробленій програмі".

Мета і задачі дослідження

Ціль дисертаційної роботи – створення способів і технічних засобів для систем контролю і захисту технічного стану електроенергооб'єкта шляхом удосконалення діагностики його ЗП методом неруйнівного контролю без розкриття ґрунту і відключення обладнання, що дозволяє визначити місце розташування елементів ЗП, а також виробити науково обґрунтовані рекомендації,

спрямовані на підвищення надійності функціонування обладнання і рівня техніки безпеки.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні основні задачі:

1. Дослідження факторів, що впливають на точність виміру глибини залягання горизонтальних заземлювачів.
2. Розробка методики і технічних засобів для визначення місця розташування вертикальних і горизонтальних заземлювачів у складній електромагнітній обстановці, а також заземлювачів, не приєднаних з однієї сторони до ЗП.
3. Розробка математичної моделі реального заземлювального пристрою.
4. Розробка програмного комплексу для розрахунку розподілу потенціалів на території об'єкта і напруги дотику на обладнанні в аварійних режимах незалежно від площі об'єкта і кількості обладнання.
5. Створення технічних засобів для проведення електромагнітної діагностики ЗП електроенергооб'єктів.
6. Експериментальна перевірка методики діагностики ЗП в реальних умовах.

Об'єкт дослідження: явища електромагнітної індукції, яке створює проблемну ситуацію визначення зв'язку з протіканням струмів у елементах ЗП, і розтікання струмів у землі.

Предмет дослідження: технічні засоби і математична модель для оцінки технічного стану ЗП різних електроенергооб'єктів.

Методи дослідження: методи теорії електромагнітного поля для визначення точної глибини залягання горизонтальних заземлювачів; індукційний метод для пошуку вертикальних і горизонтальних заземлювачів у складній електромагнітній обстановці; рівняння Максвелла, методи теорії комплексного змінного, інтегрального числення, математичного моделювання, теорії електричних ланцюгів з урахуванням нелінійної залежності і напруженості магнітного поля провідника від щільності струму і поверхневого ефекту при розробці математичної моделі; методи теорії матриць, чисельні методи рішення систем лінійних алгебраїчних рівнянь і програмування при реалізації математичної моделі; методи фізичного експерименту при перевірці теоретичних висновків і методики діагностики ЗП на діючих енергооб'єктах.

Наукова новизна одержаних результатів

У дисертаційній роботі на основі аналізу складових напруженості магнітного поля автором отримані вирази для розрахунку поправочних коефіцієнтів при вимірі глибини залягання горизонтального заземлювача за допомогою індукційного датчика з однією котушкою, які враховують скінченність розміру датчика, скінченність розміру заземлювача і розташування інших заземлювачів поруч з досліджуваним.

Розроблено методики для визначення місця розташування:

- горизонтальних заземлювачів у складній електромагнітній обстановці (поблизу об'ємних металокопункцій);
- вертикальних заземлювачів;
- горизонтальних заземлювачів не приєднаних з однієї сторони до ЗП, з використанням розробленого диференціального індукційного датчика.

Створено математичну модель нееквіпотенціального ЗП з урахуванням розташування його

в двошаровому ґрунті, лінійного розподілу струму по провіднику, а також нелінійної залежності магнітної проникності сталі від щільності протікаючого струму.

Виведено аналітичні вираження для потенціалу, наведеного довільно спрямованим у просторі провідником, що дає можливість врахувати реальне місце розташування горизонтального заземлювача досліджуваного об'єкта.

Розроблено методику перевірки адекватності розрахункової моделі реальним умовам.

Практичне значення одержаних результатів

Удосконалено діагностику ЗП, що дозволяє визначити технічний стан ЗП будь-яких об'єктів. З її допомогою можливий контроль ЗП без розкриття ґрунту і відключення об'єкта.

На підставі теоретичних розробок, виконаних у дисертації, створений диференціальний індукційний датчик, що може використовуватися при роботі в складній електромагнітній обстановці для визначення місця розташування заземлювачів у процесі обстеження ЗП високовольтних підстанцій, нафтоперегонних станцій і т.п.

Розроблений по запропонованій у дисертації математичної моделі програмний комплекс дозволяє розраховувати картину розподілу потенціалів і напругу дотику на всьому обладнанні досліджуваного об'єкта з урахуванням реального розташування ЗП.

Запропоновано засоби прискорення розрахунку ЗП: застосування ітераційного методу Зейделя для рішення системи лінійних рівнянь з використанням розробленої блочно-строкової схеми розрахунку й організація стиснутих масивів. При цьому стає можливим розраховувати об'єкти, що займають велику територію, з числом вузлів сітки більш п'яти тисяч.

У процесі виконання дисертаційної роботи за допомогою методики електромагнітної діагностики, створеного устаткування, математичної моделі і програмного комплексу було обстежено в 6-ти областях України більш 120 підстанцій, напругою 35 – 750 кВ. На 15 з них по виробленим рекомендаціям виконані ремонтні роботи.

Особистий внесок здобувача

Особистий внесок здобувача в наукові і практичні положення, що виносяться на захист:

- визначені фактори, які впливають на точність виміру глибини залягання горизонтальних заземлювачів по існуючій методиці на діючих енергооб'єктах;
- створений і пройшов дослідну експлуатацію диференціальний індукційний датчик, а також розроблені методики його використання для визначення місця розташування вертикальних заземлювачів, горизонтальних заземлювачів у складній електромагнітній обстановці і горизонтальних заземлювачів, не приєднаних з однієї сторони до ЗП;
- виведені формули для визначення сумарного потенціалу електричного поля в двошаровій землі, наведеного в точці спостереження провідником довільного напрямку для створення математичної моделі нееквіпотенціального ЗП;
- розроблений програмний комплекс, що дозволяє розраховувати довільне число вузлів сітки ЗП з автоматичним аналізом результатів розрахунку;
- проведений аналіз алгоритму розрахунку ЗП, і запропоновані способи по прискоренню розрахункових операцій завдяки створенню стиснутих масивів і застосування ітераційного методу Зейделя з розробленою блочно-строковою схемою розрахунку;

- обґрунтування проведення вимірів напруги дотику на частоті 57 Гц;
- виконання експериментальної перевірки отриманих результатів на діючих електроенерго-об'єктах.

Апробація результатів дисертації

По основним положенням і результатам дисертаційної роботи були зроблені доповіді на: семінарах НАН України "Динаміка нелінійних електромеханічних систем" у 1998, 1999 і 2000 р.; Міжнародних науково-технічних конференціях "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика" 1997, 1998, 2002 р. і "Проблеми сучасної електротехніки" 2002 р.

Публікації

Основні ідеї і результати дисертаційної роботи опубліковані в 9 статтях, 7 – зі співавторами, 2 – особисто. З них 6 – у фахових наукових журналах, 3 – у працях науково-технічних конференцій.

Структура та обсяг дисертації

Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків і додатків. Повний обсяг дисертації становить 172 сторінки, з них 46 ілюстрацій по тексту; 6 таблиць по тексту; 2 додатка на 15 сторінках; список використаних літературних джерел із 94 найменувань на 10 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі подано сутність наукової проблеми розробки технічних засобів для діагностики технічного стану ЗП електроенергооб'єктів, сформульовані мета та задачі досліджень. Обґрунтована актуальність дисертації, наукова новизна і практична цінність отриманих результатів.

У першому розділі зроблено огляд робіт по способам діагностики ЗП, проаналізовані основні функції ЗП об'єктів електроенергетики і виділені параметри, за допомогою яких у даний час оцінюється технічний стан ЗП і його працездатність: опір розтіканню струму (опір ЗП), напруга дотику і кроку, припустимий перехідний опір контактів.

Розглянуто методи виміру опору ЗП, застосовувані за рубежем і в країнах колишнього СРСР. Показано, що так як для виміру цієї величини потрібні великі відстані, відсутня можливість вимірювати її на підстанціях, розташованих у міській зоні. Тому опір ЗП можливо визначити тільки розрахунковим шляхом, для чого необхідно знати точний план розміщення ЗП, глибину його залягання, а також питомий електричний опір ґрунту, на якому розташований досліджуваний об'єкт.

Установлено, що при експериментальному визначенні величин напруги дотику і кроку існує проблема перерахування отриманих результатів на реальний струм короткого замикання. При вимірі опору зв'язки не враховуються шляхи розтікання аварійного струму з обладнання, що може привести до ушкодження кабелів, трубопроводів і т.д.

Показано, що жодна з вимірюваних величин не дає представлення про реальне розташування заземлювачів ЗП, без знання якого неможливо розрахувати розподіл потенціалів на терито-

рії об'єкта, простежити зв'язок обладнання з магістралями ЗП, що відбиває на аналізі результатів вимірів напруг дотику і кроку.

Проаналізовано новий підхід до дослідження працездатності ЗП, який полягає в тім, що на додаток до існуючих методів контролю, визначається реальне розташування заземлювачів ЗП і шляхи розтікання струму з обладнання у випадку короткого замикання або удару блискавки з використанням індукційного методу. За допомогою генератора синусоїдального струму частоти 200 Гц або 400 Гц у ЗП інжектуються перемінний струм і по величині напруженості магнітного поля, створюваного цим струмом у заземлювачах, визначаються їхні місця розташування. Однак при практичному обстеженні ЗП об'єктів виявився ряд недоліків:

- неможливість визначення місця розташування заземлювальних провідників при наявності об'ємних металевих споруджень, що знаходяться поруч з ними;
- застосовувана методика визначення глибини залягання ЗП не враховує ряд факторів, що можуть істотно вплинути на точність виміру;
- утруднено створеною апаратурою і за запропонованою методикою визначати обірвані горизонтальні і місце розташування вертикальних заземлювачів;
- для перерахування результатів виміру напруги дотику з частоти 200 Гц або 400 Гц на промислову частоту потрібні додаткові, достатньо складні виміри.

Дано оцінку існуючим програмам по математичному моделюванню розподілу потенціалів по території об'єктів електроенергетики. Показано, що програми, які реалізують математичну модель, мають обмеження по числу вузлів, що змушує розбивати реальну схему ЗП на частини, що у свою чергу приводить до похибок у розрахунку значень напруги дотику. В існуючих математичних моделях не враховується різна глибина закладки заземлювачів ЗП, що також може привести до похибки результатів розрахунку.

На підставі проведеного аналізу стану питання була сформульована мета дисертаційної роботи і поставлені задачі дослідження.

В другому розділі дане теоретичне обґрунтування запропонованих шляхів удосконалювання електромагнітної діагностики ЗП електроенергооб'єктів.

Проведено аналіз впливу ряду факторів на величину похибки при вимірі глибини залягання горизонтальних заземлювачів індукційним методом. Вважаючи, що досліджуваний заземлювач, який знаходиться в ґрунті, досить тонкий і довгий глибина залягання R може бути визначена зі співвідношення, заснованого на законі повного струму:

$$R = \frac{X}{(H_1/H_2) - 1} - r_d, \quad (1)$$

де X – відстань точки виміру від поверхні ґрунту; r_d – радіус корпусу датчика; H_1 – напруженість магнітного поля, створюваного струмом, що протікає в досліджуваному заземлювачі, визначена на відстані $R+r_d$ від осі заземлювача; H_2 – напруженість магнітного поля, створюваного струмом, що протікає в досліджуваному заземлювачі, визначена на відстані $X+R$ від осі заземлювача.

З практичної точки зору доцільно домагатися, щоб відношення $H_1/H_2=2$, тому що при цьому глибина залягання провідника R дорівнює висоті переміщення датчика X і в польових умовах не потрібно робити яких-небудь додаткових обчислень для визначення глибини залягання (зви-

чайно $R \gg r_d$ і впливом розмірів датчика зневажають, що практично виправдано). Однак, у реальних умовах в залежності від відстані між заземлювачами, видаленні від краю ЗП і

скінченності розмірів котушки індукційного датчика (ІД) точність виміру глибини буде різною (див. рис. 1). На підставі аналізу сумарних напруженостей полів від поруч розташованих провідників були виведені залежності для точного визначення глибини залягання заземлювачів при відомій топології їхнього розташування:

Рис. 1. Взаємне розташування провідників ЗП

$$(R + X) \left(1 + 2 \frac{R^2}{A^2 + R^2} \right) = 2R \left[1 + 2 \frac{(R + X)^2}{A^2 + (R + X)^2} \right]. \quad (2)$$

Результати рішення (2) при фіксованих значеннях X і A у вигляді сімейства кривих приведені на рис. 2.

Рис. 2. Залежності коефіцієнта $K=f(X)$ при:
 1 – $A=1$ м; 2 – $A=3$ м; 3 – $A=5$ м; 4 – $A=7$ м;
 5 – $A=9$ м; 6 – $A=11$ м; 7 – $A=13$ м; 8 – $A=15$ м;
 9 – $A=17$ м; 10 – $A=20$ м

При цьому глибина залягання провідника при відомих X і A може бути визначена зі співвідношення: $R=KX$, де K визначається з графіка, приведеного на рис. 2. Установлено, що при кроці сітки більш 10 м і глибинах залягання заземлювача до 1 м похибка обчислень за допомогою співвідношення (1) не перевищує 10%, що достатньо для практичних цілей. Визначення величини K вироблялося в допущенні, що заземлювачі достатньо віддалені від краю ЗП, а для обчислення напруженості магнітного поля використовувався закон повного струму. При визначенні глибини залягання заземлювачів, розташованих близько до краю ЗП, по співвідношенню $R=KX$ це може привести до значної похибки.

У загальному випадку для одного провідника кінцевої довжини (рис. 3) напруженість магнітного поля H дорівнює:

$$H = \frac{I}{4\pi h} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2). \quad (3)$$

Рис. 3. Провідник кінцевої довжини

Виразимо косинуси кутів через геометричні розміри і використовуючи принцип суперпозиції полів для визначення сумарного магнітного поля системи з трьох провідників (див. рис. 1) у точці спостереження і на поверхні землі і вважаючи їхнє відношення рівне двом, отримано, що при фіксованих A , X , R величина B визначається з рішення системи нелінійних рівнянь виду:

$$\frac{(mR + X) \left[1 + \frac{B}{\sqrt{B^2 + (mR)^2}} + 2Q \frac{(mR)^2}{A^2 + (mR)^2} \right]}{mR \left[1 + \frac{B}{\sqrt{B^2 + (mR + X)^2}} + 2G \frac{(mR + X)^2}{A^2 + (mR + X)^2} \right]} = 2, \quad (4)$$

де $Q = 1 + \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2 + (mR)^2}}$; $G = 1 + \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2 + (mR + X)^2}}$; $m=1,1$.

Для фіксованого значення X з усіх B , розрахованих для всього діапазону зміни A , вибиралося максимальне значення і побудований їхній графік зміни, приведений на рис. 4. Таким чином, можна затверджувати, що якщо для обміркованої

Рис. 4. Залежність $V=f(X)$

глибини X відстань від проекції точки спостереження на вісь провідника до його закінчення не менше визначеного з рис. 4, то похибка обчислення глибини по співвідношенню $R=KX$ складе не більш 10 %. У протилежному випадку похибка виміру обчислюється по співвідношенню $\Delta=100(m-1)\%$, де m – коефіцієнт, обумовлений з (4) при відомих X і топології розташування провідників.

При дослідженні впливу скінченності розмірів ІД установлено, що починаючи з глибини залягання горизонтального заземлювача більш 78 мм, похибка виміру складе не більш 10% якщо діаметр котушки ІД не перевищує 80 мм.

Для визначення місця розташування горизонтальних заземлювачів у складній електромагнітній обстановці запропоновані два способи. Перший полягає у введенні компенсатора в завадостворюючий ланцюг. Схеми заміщення без компенсатора і з введенням його приведені на рис. 5 і рис. 6 відповідно.

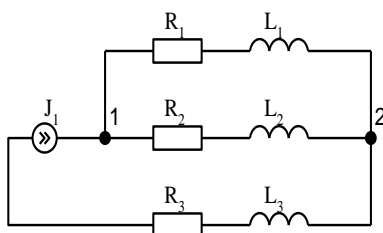


Рис. 5. Схема заміщення без введення компенсатора

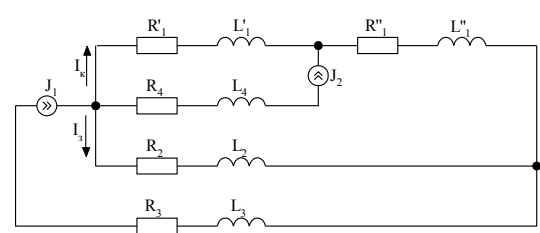


Рис. 6. Схема заміщення з введенням компенсатора

Розрахувавши схему, показану на рис. 6, одержимо залежність струму компенсатора J_2 від струму джерела J_1 :

$$J_2 = \frac{J_1 \cdot z_2}{z_1'' + z_2}. \quad (5)$$

У програмному пакеті Micro-Cap для конкретних параметрів були промодельовані схеми, приведені на рис. 5 і рис. 6 для перевірки ефективності роботи компенсатора. Результати представлені у виді графіків на рис. 7 і рис. 8 відповідно.

а)

б)

Рис. 7. Результати моделювання схем у програмному пакеті Micro-Cap:

а) без уведення компенсатора; б) із уведенням компенсатора

Аналіз отриманих результатів показав, що струм у завадостворюючому ланцюзі зменшився практично в 100 разів (без компенсатора (рис. 7 а) струм у ланцюзі дорівнює 0,925 А, а при введенні компенсатора (рис. 7 б) – 0,01 А). Отже, застосування компенсатора дозволить послабити магнітне поле, що наводиться струмом, який протікає в металоконструкції, і без особливих утруднень визначати місце розташування заземлювальних шин, прокладених поруч з ними.

Однак даний спосіб має недоліки: складність його реалізації і труднощі вибору точок приєднання компенсатора через складність геометричного перерізу металоконструкцій.

Другий спосіб рішення цієї задачі ґрунтується на застосуванні запропонованого диференціального ІД, що представляє собою систему з двох довгих циліндричних зустрічно підключених котушок, що вимірюють вертикальну складову вектора магнітного поля. Такий ІД є, власне кажучи, вимірником неоднорідності напруженості магнітного поля уздовж напрямку, перпендикулярного осям обмоток і лежачого в їхній площині. Була виведена залежність для визначення амплітуди сигналу на виході диференціального ІД при приміщенні його в поле відокремленого провідника зі струмом:

$$U(x) = -\mu_0 \cdot \mu \cdot S \cdot N \cdot f \cdot I \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{x^2 + R^2}} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \arctg\left(\frac{x}{R}\right)\right) - \frac{1}{\sqrt{(x - \Delta)^2 + R^2}} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \arctg\left(\frac{x - \Delta}{R}\right)\right) \right], \quad (6)$$

де S – площа витка обмотки; N – число витків обмотки; f – частота магнітного поля; I – струм у провіднику; R – відстань від провідника зі струмом до поверхні землі; x – зміщення центра датчика по осі абсцис щодо провідника зі струмом; μ – відносна магнітна проникність феритового сердечника; Δ – відстань між осями обмоток ІД.

При розташуванні даного датчика строго над заземлювачем вертикальні складові напруженості магнітного поля в зонах обмоток від однорідного поля металоконструкції збігаються, і за рахунок зустрічного підключення обмоток ІД відбудеться взаємне вирахування наведених ними сигналів. Сигнали, які обумовлені вертикальними складовими магнітного поля заземлювача, навпроти, будуть складені, оскільки вони спрямовані протилежно один одному. Були зняті експеримен-

тальні залежності для порівняння гостроти діаграм спрямованості диференціального ІД і ІД з однією котушкою. З приведених залежностей видно (рис. 8), що запропонована конструкція диференціального ІД дозволяє одержати більш гостру діаграму спрямованості в порівнянні з використанням єдиної циліндричної обмотки, що, у сукупності з підвищеною перешкодозахищеністю, робить ефективним його використання в складній електромагнітній обстановці, що виникає при обстеженні ЗП об'єктів електроенергетики.

а) б)
Рис. 8. Напряга на виході ІД:

а) диференціальний ІД;
б) ІД з єдиною циліндричною обмоткою

Для визначення місця розташування вертикальних заземлювачів було проаналізовано магнітне поле горизонтальної шини ЗП, уздовж якого з деяким кроком розташовані вертикальні стрижні. При протіканні по ній струму, частина його відгалужується в кожному вузлі підключення вертикального стрижня, але вона мала в порівнянні зі струмом горизонтального заземлювача. Тому помітного падіння величини напруженості магнітного поля за вертикальним заземлювачем звичайно не спостерігається. Запропоновано в цьому випадку використовувати диференціальний ІД, тому що неоднорідність магнітного поля швидко спадає при видаленні від вертикального заземлювача і вже на відстані декількох дециметрів практично дорівнює нулю.

На підставі проведених експериментів по визначенню розподілу потенціалу заземлювача, не приєднаного з однієї сторони до ЗП, запропонований спосіб визначення його місця розташування.

Третій розділ присвячений створенню математичної моделі ЗП і програмного комплексу для її реалізації. При розробці математичної моделі ЗП була врахована складна залежність опору матеріалу електродів від величини струму, що протікає по них, а також той факт, що ЗП розташовано в землі з двошаровою електричною структурою.

Рішення цієї задачі виконувалося методом послідовних наближень у два етапи. На першому етапі визначалася щільність струму, що стікає з заземлювача і провідності кожного вузла відносно зони нульового потенціалу. Кожен заземлювач ЗП представлявся у виді безлічі елементарних точкових джерел струму, розміщених на його осі. Щільність струму такого джерела має вигляд:

$$j_i(\ell_i) = j_i^{\text{beg}} + (j_i^{\text{end}} - j_i^{\text{beg}}) \frac{\ell_i}{L_i}, \quad (7)$$

де j_i^{beg} – щільність струму в початковому вузлі і-того електрода; j_i^{end} – щільність струму в кінцевому вузлі і-того електрода; ℓ_i – відстань уздовж і-того електрода, визначена від його початкового вузла; L_i – довжина і-того електрода. Потенціал стаціонарного електричного поля такого точково-

го джерела струму, розташованого в двошаровій землі, питомий електричний опір шарів якої дорівнює ρ_1 і ρ_2 (точка спостереження і точкове джерело розташовані в першому шарі), має вигляд:

$$d\varphi_i = \frac{\rho_1 j_i d\ell_i}{4\pi} \left[\alpha_{1i} + \alpha_{2i} + \sum_{n=1}^{\infty} k_{2,1}^n (\alpha_{3i} + \alpha_{4i} + \alpha_{5i} + \alpha_{6i}) \right], \quad (8)$$

де $k_{2,1} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$; α_{ij} – коефіцієнти, що залежать від геометричного положення точкового джерела.

Були виведені формули сумарного потенціалу електричного поля в двошаровій землі, створюваного в точці спостереження струмами точкових джерел заземлювача довільного напрямку. Для випадку, коли точка спостереження й електрод розташовані в першому шарі, вона має вигляд:

$$\begin{aligned} \varphi_i = & j_i^{\text{begin}} \left[\frac{\rho_1}{4\pi} \left(G_{1i} + G_{2i} + \sum_{n=1}^{\infty} k_{2,1}^n (G_{3i} + G_{4i} + G_{5i} + G_{6i}) \right) - \right. \\ & \left. - \frac{\rho_1}{4\pi} \left(K_{1i} + K_{2i} + \sum_{n=1}^{\infty} k_{2,1}^n (K_{3i} + K_{4i} + K_{5i} + K_{6i}) \right) \right] + , \quad (9) \\ & + j_i^{\text{end}} \left[\frac{\rho_1}{4\pi} \left(K_{1i} + K_{2i} + \sum_{n=1}^{\infty} k_{2,1}^n (K_{3i} + K_{4i} + K_{5i} + K_{6i}) \right) \right] \end{aligned}$$

де G_{mi} і K_{mi} рішення інтегралів виду:

$$\begin{aligned} G_{mi} &= \int_0^{L_i} \frac{d\ell_i}{\sqrt{\frac{A_i}{L_i^2} \ell_i^2 + \frac{B_{mi}}{L_i} \ell_i + C_{mi}}} = \frac{L_i}{\sqrt{A_i}} \left(\ln \left| \frac{2A_i + B_{mi}}{2\sqrt{A_i}} + \sqrt{A_i + B_{mi} + C_{mi}} \right| - \ln \left| \frac{B_{mi}}{2\sqrt{A_i}} + \sqrt{C_{mi}} \right| \right); \\ K_{mi} &= \int_0^{L_i} \frac{\ell_i d\ell_i}{\sqrt{\frac{A_i}{L_i^2} \ell_i^2 + \frac{B_{mi}}{L_i} \ell_i + C_{mi}}} = \frac{2(\sqrt{A_i + B_{mi} + C_{mi}} - \sqrt{C_{mi}}) - G_{mi} B_{mi}}{2A_i} \cdot L_i, \end{aligned}$$

де A_i , B_{ji} , C_{ji} – коефіцієнти, що залежать від геометричного положення електрода і точки спостереження.

Для обчислення невідомих щільностей струму точка спостереження послідовно розташовувалася у всіх підземних вузлах ЗП, і в результаті записується система лінійних алгебраїчних рівнянь щодо невідомих щільностей струмів:

$$|\mathbf{d}| \cdot |\mathbf{j}| = |\dot{\Phi}|, \quad (10)$$

Для початкового наближення потенціали усіх вузлів прийняти рівними "1". Результатом рішення системи рівнянь є щільність струмів, що стікають з вузлів заземлювача. Далі визначаються провідності вузлів заземлювача відносно зони нульового потенціалу, чим завершується перший етап.

На другому етапі розраховуються потенціали вузлів сітки ЗП за схемою заміщення, показаної на рис. 9. Вона містить p віток і q вузлів. Конструктивні особливості ЗП підстанції такі, що $p - q + 1 > q - 1$. Тому визначення потенціалів вузлів ЗП виконано методом вузлових напруг. У двох вузлах схеми струми задані. Перший – у вузлі, що приєднаний до нейтралі силового трансформатора підстанції, другий – у вузлі, що відповідає місцю короткого замикання.

Система рівнянь по методу вузлових напруг має вигляд:

$$Y_{kk} \dot{U}_{k0}^{(s)} - \sum_{m=0}^{q-1} Y_{km} \dot{U}_{m0}^{(s)} = \dot{I}_k, \quad (11)$$

де Y_{kk} – сума повних провідностей усіх віток, приєднаних до k -того вузла; Y_{km} – повна провідність вітки між вузлами k і m ; $\dot{U}_{k0}^{(s)}$, $\dot{U}_{m0}^{(s)}$ – напруги у вузлах k і m ; \dot{I}_k – заданий струм у k -тім вузлі.

Після визначення провідностей віток схеми заміщення і з урахуванням знайдених на першому етапі провідностей вузлів відносно зони нульового потенціалу вирішується система рівнянь і знаходяться потенціали вузлів сітки.

Рис. 9. Схема заміщення ЗП

ли вузлів сітки.

Отримані значення потенціалів вузлів підставляються в систему рівнянь (11) для визначення щільностей струмів і знаходяться нові їхні значення. Послідовні наближення варто припинити, якщо помилка буде менше заданої величини. При виконанні даної умови визначається опір розтіканню струму у вузлах, де задані струми не рівні нулю і значення напруги дотику в обраних вузлах.

Для створеної математичної моделі був розроблений програмний комплекс, що служить для розрахунку складних ЗП різних об'єктів. Він дозволяє розраховувати довільне число вузлів шляхом застосування динамічного розподілу оперативної пам'яті комп'ютера і складається з трьох частин: вхідного інтерфейсу для уведення вихідних даних, розрахункової частини і частини аналізу, у якій виробляється обробка отриманих результатів. Вимога розрахунку ЗП довільної конфігурації визначило завдання його за допомогою способу індивідуального кодування провідників. У цьому випадку розрахункова схема ЗП складається з вузлів і зв'язків між ними.

Розроблений графічний інтерфейс для введення схеми ЗП, електричних параметрів ЗП і ґрунту, дозволяє уникнути помилок при застосуванні індивідуального кодування провідників, а також введений автоматичний аналіз результатів розрахунку напруги дотику в різних режимах на всьому обладнанні підстанції, що дозволяє істотно знизити трудомісткість і час обробки отриманих результатів.

Зроблені удосконалення, що дозволяють істотно знизити час розрахунку при великій кількості вузлів ЗП за рахунок створення стиснутих масивів шляхом виключення нульових елементів з них для звільнення оперативної пам'яті і забезпечення відсутності звертання до диску і застосування ітераційного методу Зейделя для рішення системи рівнянь (10) з використанням розробленої блочно-строкової схеми розрахунку.

У четвертому розділі запропонована методика електромагнітної діагностики технічного стану ЗП об'єктів енергетики, що складається з трьох етапів:

– експериментального, який містить у собі визначення: місця розташування горизонтальних заземлювачів ЗП, їхньої глибини залягання, місця розташування вертикальних заземлювачів, шляхів підключення обладнання до ЗП, експериментальних значень напруги дотику на обладнанні, опору ЗП, корозійного стану ЗП;

- розрахункового, який містить у собі перевірку адекватності розрахункової моделі реальним умовам, визначення розподілу потенціалів по території об'єкта, розрахункових значень напруги дотику на устаткуванні й опору ЗП;

- вироблення рекомендацій по результатах експериментальних досліджень (відповідність вимогам нормативних документів) і на підставі результатів розрахунків (зменшення значень напруги дотику до припустимої величини).

Розроблено методики роботи з диференціальним ІД:

- для виявлення заземлювачів, розташованих поблизу об'ємних металевих об'єктів;
- виміру глибини залягання горизонтальних заземлювачів;
- визначення місця розташування вертикальних заземлювачів.

Розроблено методику перевірки адекватності розрахункової моделі реальним умовам. Визначено види вироблюваних рекомендацій на підставі результатів перших двох етапів – експериментального і розрахункового. Показано, що завдяки проведеним розрахункам при всіх аварійних режимах після введення рекомендацій, ЗП підстанції можна вважати відповідним вимогам на припустиму величину напруги дотику. Це дає можливість істотно знизити витрати на проведення ремонтних робіт.

П'ятий розділ присвячений технічним засобам для проведення електромагнітної діагностики ЗП електроенергооб'єктів і експериментальної апробації розробленої методики з метою підтвердження її практичної цінності.

Сформульовано основні вимоги, описані конструкції і технічні характеристики вимірювального комплексу КДЗ-1У, що складається з генератора синусоїдального струму заданої частоти (ГСТ), вимірника магнітного поля і напруги частотою 211 і 419 Гц (ІМПН 211/419), вимірника напруги 57 Гц (ІН-57), підвищуючого трансформатора (ТП) і диференціального ІД, за допомогою яких виробляється електромагнітна діагностика ЗП.

Показано, що з 45 обстежених підстанцій 44 мали значення опору ЗП в межах допуску, у той час як його конструктивне виконання і величини напруги дотику на обладнанні не відповідали вимогам нормативних документів. Слід зауважити, що по традиційних методиках на 15 підстанціях вимірювати значення опору ЗП взагалі не представлялося можливим, тому що вони розташовані в міській зоні або на території заводу, що не дозволяє винести токовий електрод на відстань рівну 2-3 діагоналям підстанції. У цих випадках контролювати працездатність ЗП по вимогах до припустимої величини опору ЗП практично неможливо.

За результатами аналізу обстежених ЗП приведені численні приклади порушень ЗП високовольтних підстанцій і НПС у частині заземлювальної сітки, неприєднання обладнання, прокладки кабелів, приєднання блискавкоприймачів і т.д.

Показано переваги проведення розрахунків по визначенню розподілу потенціалів і значень напруги дотику на всьому обладнанні підстанції, і можливість з їхньою допомогою цілеспрямовано видавати рекомендації по приведенню ЗП у відповідність з вимогами нормативних документів.

Доведено можливість мінімізації витрат при проведенні реконструкції ЗП з використанням результатів, отриманих при проведенні електромагнітної діагностики.

На прикладі експлуатації підстанцій Запорізьких Східних електричних мереж встановлено, що після проведення ремонтних робіт по виробленим рекомендаціям обладнання на підстанціях перестало виходити з ладу через несправний ЗП.

ВИСНОВКИ

Таким чином, у дисертаційній роботі вирішена важлива наукова і практична задача створення технічного засобу для контролю та захисту технічного стану електроенергооб'єкта шляхом удосконалення методики діагностики його заземлювального пристрою методом неруйнівного контролю без розкриття ґрунту та відключення обладнання. У ході проведених досліджень отримані наступні наукові і технічні результати.

1. Проведено аналіз впливу ряду факторів на величину похибки при вимірі глибини залягання горизонтальних заземлювачів індукційним методом. При цьому показано, що:

– при глибині залягання заземлювальних провідників не менш 78 мм впливом скінченності розмірів провідників і котушки індукційного датчика можна зневажити (у межах 10 % похибки);

– глибина залягання заземлювачів ЗП з похибкою не більш 10 % може бути прийнята рівній величині переміщення котушки датчика від поверхні ґрунту, при якому показання зменшуються в два рази у випадку, якщо це переміщення лежить у діапазоні 0,078...1 м і крок сітки заземлювача не менш 10 м, а невитримані цих умов визначена глибина повинна бути скоректована з використанням кривих рис. 2;

– визначені умови для вибору величини відстані від проекції точки спостереження на вісь провідника до кінця сітки, виконання яких дозволяє робити вимір глибини залягання з похибкою не більш 10 %.

2. Проаналізовано процеси, що відбуваються в системі заземлення при протіканні в ній струму, і показана можливість визначення траси прокладки горизонтального заземлювача в складній електромагнітній обстановці при використанні створеного автором диференціального індукційного датчика замість індукційного датчика з однією котушкою.

3. На підставі проведених експериментальних досліджень по визначенню електричних і магнітних полів горизонтального заземлювача, не приєданого з однієї сторони до ЗП, запропонований спосіб його визначення шляхом виміру його потенціалу, що при наближенні до обірваного кінця горизонтального заземлювача істотно підвищується.

4. Створено математичну модель нееквіпотенціального ЗП об'єктів електроенергетики з урахуванням розташування його в двошаровому ґрунті, лінійного розподілу струму по провіднику, а також нелінійної залежності магнітної проникності сталі від щільності протікаючого струму.

5. Виведені співвідношення для розрахунку потенціалу, наведеного довільно спрямованим провідником зі струмом з урахуванням лінійного закону розподілу щільності струму по електроду від його початкового вузла до кінцевого.

6. Розроблено програмний комплекс з графічним інтерфейсом для введення схеми ЗП, електричних параметрів ЗП і ґрунту, що дозволяє уникнути помилок при застосуванні індивідуального кодування провідників, а також введений автоматичний аналіз результатів розрахунку напруги

дотику в різних режимах на всьому обладнанні підстанції, що істотно знижує трудоемність і час обробки одержуваних результатів. Запропонований програмний комплекс дозволяє розраховувати довільне число вузлів шляхом застосування динамічного розподілу оперативної пам'яті комп'ютера.

7. Проведено аналіз алгоритму розрахунку, і запропоновані способи по прискоренню розрахункових операцій у програмі, що дозволяють істотно знизити час розрахунку при великій кількості вузлів ЗП за рахунок створення стиснутих масивів, застосування ітераційного методу Зейделя для рішення системи рівнянь з розробленою блочно-строковою схемою розрахунку для об'єктів з великою кількістю вузлів (більш п'яти тисяч).

8. Створено і пройшов досліду експлуатацію диференціальний індукційний датчик, що дозволяє визначити трасу прокладки заземлювача в складній електромагнітній обстановці, місце розташування вертикальних елементів і не приєднаних з однієї сторони горизонтальних заземлювачів. Описано конструкцію вимірювального комплексу КДЗ-1У с індукційним датчиком, за допомогою якого виробляється електромагнітна діагностика ЗП.

9. Розроблено методики:

- роботи з диференціальним індукційним датчиком для виявлення заземлювачів, розташованих поблизу об'ємних металевих об'єктів, де за допомогою традиційного індукційного датчика важко одержати достовірну інформацію через вплив сильного завадостворюючого магнітного поля;

- визначення місця розташування вертикальних заземлювачів з використанням традиційного індукційного датчика з однією котушкою і диференціальним індукційним датчиком;

- визначення місця розташування заземлювача, не приєданого з однієї сторони к ЗП;

- перевірки адекватності розрахункової моделі реальним умовам.

10. Визначено види рекомендацій, що виробляються на підставі перших двох етапів – експериментального і розрахункового. Показано, що завдяки проведеним розрахункам при всіх аварійних режимах після вироблення рекомендацій, ЗП підстанції можна вважати відповідним вимогам на припустиму величину напруги дотику. Це дає можливість істотно знизити витрати на проведення ремонтних робіт.

11. Показано, що на 44 з 45 обстежених підстанцій, виконаних з дотриманням вимог до припустимого опору ЗП значення його не перевищує допуск, у той час як конструктивне виконання ЗП і значення напруги дотику не відповідали вимогам нормативних документів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Резинкин О.Л., Колиушко Д.Г. Индукционный датчик для диагностики контуров заземления высоковольтных подстанций // Энергетика и электрификация. – Киев, 1999. – № 8. – С. 36-39.

Здобувачем проведено: вивід формули розрахунку вихідної напруги диференціального індукційного датчика, порівняння вихідних характеристик диференціального індукційного датчика й індукційного датчика з однією котушкою, проведення експериментального порівняння.

2. Борисов Р.К., Колиушко Г.М., Гримуд Г.И., Васьковский А.П., Чевычелов В.А., Колиушко Д.Г. Методика исследования заземляющих устройств объектов электроэнергетики // Энергетика и электрификация. – Киев, 2000. – № 4. – С. 29-32.

Здобувачем виконано: оцінка існуючих методів контролю заземлювального пристрою, опис методики роботи з розрахунковою моделлю, класифікація порушень що зустрічаються найбільш часто, області застосування методики електромагнітної діагностики.

3. Петков А.А., Колиушко Д.Г. Особенности применения индукционного метода при определении глубины залегания заземлителей распределительных устройств // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 2000. – Вып. 82. – С. 75-78.

Здобувачем виконано: аналіз методики виміру глибини, визначення основних факторів, що впливають на похибку при проведенні виміру глибини залягання горизонтальних заземлювачів, практична перевірка отриманих результатів.

4. Колиушко Г.М., Носулько В.Д., Воронина З.А., Колиушко Д.Г. Опыт обследования заземляющих устройств подстанций напряжением 150 кВ Запорожских Восточных электрических сетей // Энергетика и электрификация. – Киев, 2000. – № 7. – С. 24-26.

Здобувачем виконано: експериментальне проведення вимірів і аналіз отриманих результатів.

5. Колиушко Г.М., Доценко В.И., Колиушко Д.Г., Недзельский О.С. Измерительный комплекс для проведения электромагнитной диагностики состояния заземляющих устройств энергообъектов // Вестник Национального технического университета "ХПИ". – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2002. – № 7. – С. 157-166.

Здобувачем виконано: формулювання основних вимог до розроблювальних технічних засобів, обґрунтування проведення вимірів напруги дотику на частоті 57 Гц.

6. Линк И.Ю., Колиушко Д.Г., Колиушко Г.М. Математическая модель неэквипотенциального заземляющего устройства подстанции, размещенного в двухслойном грунте // Электронное моделирование. – Киев, 2003. – Т. 25, № 2. – С. 99-111.

Здобувачем виконано: побудова геометричної моделі заземлювального пристрою, вивід формул для визначення сумарного потенціалу електричного поля в двошаровій землі, створеного в точці спостереження провідником довільного напрямку.

7. Борисов Р.К., Воронина З.А., Колиушко Г.М., Колиушко Д.Г. К вопросу о диагностике заземляющих устройств электротехнических комплексов // Труды Междунар. конф. "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика" – Харьков: Основа. – 1997. – С. 339-340.

Здобувачем виконано: формулювання основних вимог для розробки методики електромагнітної діагностики.

8. Колиушко Д.Г. Особенность диагностики заземляющих шин при наличии наземных металлоконструкций // Вестник Харьковского государственного политехнического института. – Харьков: ХГПУ, 1998. – Спец. вып. – С. 373-374.

9. Колиушко Д.Г. Приведение ЗУ подстанции в соответствие с требованиями нормативных документов на основании результатов электромагнитной диагностики // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". – Харьков: НТУ "ХПИ". – Вып. 12, Т. 2. – 2002. – С. 552-554.

АНОТАЦІЇ

Коліушко Д.Г. Удосконалювання діагностики заземлювальних пристроїв електроенергооб'єктів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2003.

Дисертація присвячена створенню способів і технічних засобів для систем контролю і захисту технічного стану електроенергооб'єкта шляхом удосконалення діагностики його заземлювального пристрою методом неруйнівного контролю без розкриття ґрунту і відключення обладнання.

На підставі аналізу складових напруженості магнітного поля отримані вирази для розрахунку поправочних коефіцієнтів при вимірі глибини залягання горизонтального заземлювача за допомогою індукційного датчика.

З використанням створеного диференціального індукційного датчика розроблені методики для визначення місця розташування вертикальних і горизонтальних заземлювачів у складній електромагнітній обстановці, а також горизонтальних заземлювачів, не приєднаних з однієї сторони до заземлювального пристрою.

Створено математичну модель нееквіпотенціального ЗП з урахуванням розташування його в двошаровому ґрунті, лінійного розподілу струму по провіднику, а також нелінійної залежності магнітної проникності стали від щільності струму. Виведено аналітичні вираження для потенціалу, наведеного довільно спрямованим у просторі провідником.

Запропоновано способи прискорення розрахунку ЗП: застосування ітераційного методу Зейделя для рішення системи лінійних рівнянь з використанням розробленої блочно-строкової схеми розрахунку й організація стиснутих масивів за рахунок виключення нульових елементів з них.

Проведено експериментальну перевірку методики діагностики ЗП на діючих об'єктах без розкриття ґрунту і відключення обладнання.

Ключові слова: технічні способи, діагностика заземлювального пристрою, технічний стан електроенергооб'єкта, індукційний метод, математичне моделювання заземлювального пристрою, технічні засоби.

Колиушко Д.Г. Совершенствование диагностики заземляющих устройств электро-энергообъектов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля и определения состава веществ. – Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2003.

Диссертация посвящена созданию способов и технических средств для систем контроля и защиты технического состояния электроэнергообъекта путем усовершенствования диагностики его ЗУ методом неразрушающего контроля без вскрытия грунта и отключения оборудования.

На основании анализа составляющих напряженности магнитного поля автором получены выражения для расчета поправочных коэффициентов при измерении глубины залегания горизонтального заземлителя с помощью индукционного датчика с одной катушкой, учитывающие конечный размер датчика, конечный размер заземлителя и расположение других заземлителей рядом с исследуемым.

С использованием созданного дифференциального индукционного датчика разработаны методики для определения месторасположения горизонтальных заземлителей в сложной электромагнитной обстановке, вертикальных заземлителей, а также горизонтальных заземлителей не присоединенных с одной стороны к заземляющему устройству. Для созданного дифференциального индукционного датчика разработаны методики измерения глубины залегания горизонтальных заземлителей и их поиск с повышенной чувствительностью.

Создана математическая модель неэквипотенциального заземляющего устройства с учетом расположения его в двухслойном грунте, линейного распределения тока по проводнику, а также нелинейной зависимости магнитной проницаемости стали от плотности протекающего тока. Выведены аналитические выражения для потенциала, наведенного произвольно направленным в пространстве проводником, что дает возможность учесть реальное месторасположение горизонтального заземлителя исследуемого объекта.

Разработанный по предложенной в диссертации математической модели программный комплекс позволяет рассчитывать картину распределения потенциалов и напряжение прикосновения на всем оборудовании исследуемого объекта с учетом реального месторасположения заземляющего устройства без ограничения по числу узлов заземляющей сетки. Предложены способы ускорения расчета заземляющего устройства: применение итерационного метода Зейделя для решения системы линейных уравнений с использованием разработанной блочно-строковой схемы расчета для избежания обращения к жесткому диску и организация сжатых массивов за счет исключения нулевых элементов из них. Разработана методика работы с расчетной программой и порядок проверки адекватности расчетной модели реальным условиям.

Сформулированы основные требования, описаны конструкции и технические характеристики измерительного комплекса КДЗ-1У, состоящего из генератора синусоидального тока заданной частоты (ГСТ), измерителя магнитного поля и напряжения частотой 211 и 419 Гц (ИМПН 211/419), измерителя напряжения 57 Гц (ИН-57), повышающего трансформатора (ТП) и дифференциального индукционного датчика, с помощью которых производится электромагнитная диагностика ЗУ. Обоснована необходимость применения частоты 57 Гц для измерения величины напряжения прикосновения.

Проведена экспериментальная проверка методики диагностики заземляющих устройств на действующих объектах без вскрытия грунта и отключения оборудования. Показано, что из 45 обследованных подстанций 44 имели значение сопротивления заземляющего устройства в пределах допуска, в то время как его конструктивное выполнение и величины напряжения прикосновения на оборудовании не соответствовали требованиям нормативных документов. Проведен анализ результатов исследования и указаны типовые нарушения выполнения заземляющего устройства. Установлено, что после проведения ремонтно-восстановительных работ на подстанциях Запорожских Восточных электрических сетей по выработанным рекомендациям оборудование перестало выходить из строя по причине неисправного заземляющего устройства.

Ключевые слова: технические способы, диагностика заземляющего устройства, техническое состояние электроэнергообъекта, индукционный метод, математическое моделирование заземляющего устройства, технические средства.

Koliushko D.G. Perfection of diagnostics grounding systems of power industry objects.– Manuscript.

Thesis for a candidate's degree in speciality 05.11.13 – devices and methods control and definition substances compositions. – National Technical University "Kharkiv Polytechnical Institute", Kharkiv, 2003.

The dissertation is devoted to creation of ways and facilities for monitoring and protection systems for power industry objects technical state by means of improving grounding systems diagnostics with a nondestructive control method without digging and switching off equipment.

On the basis of magnetizing force components analysis, dependences of correction factors are obtained at measurement of horizontal grounding electrode depth using an inductive gage.

With application of a differential inductive gage designed, techniques for locating horizontal ground electrodes in difficult electromagnetic conditions, vertical ground electrodes, and also horizontal ground electrodes connected to grounding system from only one side are developed.

A mathematical model of nonequipotential grounding system is created taken into account its location in a two-layer soil, linear current distribution in conductor, and nonlinear dependence of magnetic permeability of steel on current density. Analytical expressions for potential induced by arbitrary-oriented ground electrode are derived.

Ways of accelerating grounding system calculations are suggested, namely: application of Zeidel's iterative method for solving linear equations system with the developed block-line calculation procedure and organization of compressed arrays based on removing zero elements.

Experimental testing of the grounding systems diagnostics technique at working objects without digging and switching off equipment is performed.

Key words: technical methods, grounding systems diagnostics, technical state of power industry objects, induction method, mathematical modelling of grounding system, technique.

Відповідальний за підготовку к.т.н., доц. Горкунов Б.М.